文章编号:1000-4939(2023)05-1154-10

考虑方向效应的钢纤维混凝土损伤破坏数值分析

覃源[1],苏江霞[1],曹靖[1],周恒[2]

(1. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室,710048 西安;
2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司,710065 西安)

摘 要:钢纤维的平均方向效应系数是表征纤维综合取向性对混凝土性能影响的一个重要因素。为了从细观层次探究平均方向效应系数对钢纤维增强混凝土复合材料损伤开裂的影响,本研究基于有限元软件参数化语言,建立了由钢纤维、水泥砂浆以及界面过渡区三相材料构成的二维钢纤维混凝土模型,并模拟了不同平均方向效应系数下钢纤维混凝土单轴拉伸破坏的全过程。结果表明:混凝土的抗拉强度随着平均方向效应系数的增大而提高;钢纤维对混凝土的阻裂增韧效应也随之增强,进一步揭示了钢纤维混凝土在单轴拉伸条件下混凝土的损伤破坏机理。

关键词:混凝土;钢纤维混凝土;方向效应系数;数值模拟;细观

中图分类号:TU528.572 **文献标志码**:A **DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2023.05.021

Numerical analysis of damage and failure of steel fiber reinforced concrete considering orientation coefficient

QIN Yuan[1],SU Jiangxia[1],CAO Jing[1],ZHOU Heng[2]

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, 710048 Xi'an, China;
2. Power China Northwest of Engineering Corporation Limited, 710065 Xi'an, China)

Abstract: The average orientation coefficient of steel fiber is an important factor to characterize the influence of fiber comprehensive orientation on concrete performance. In order to explore the influence of average orientation coefficient of steel fiber on the damage and cracking of steel fiber reinforced concrete composites in microscopic level, in this paper, a two-dimensional finite element model of steel fiber reinforced concrete composed of steel fiber, cement mortar and interface transition zone of three-phase materials was established based on the parametric language, and the whole process of uniaxial tensile failure of steel fiber reinforced concrete under different average orientation coefficient was simulated. Results show that the tensile strength of concrete increase with the average orientation coefficient; the crack resistance and toughening effect of steel fiber on concrete is also enhanced, which further reveals the damage mechanism of steel fiber reinforced concrete under uniaxial tension.

Key words: concretes; steel fiber reinforced concrete; orientation coefficient; numerical simulation; microscopic

---

收稿日期:2023-04-25 **修回日期**:2023-06-21

基金项目:国家基金委资助项目(No. 52079109);陕西省科技创新团队资助项目(No. 2022TD-01)

通信作者:曹靖。E-mail: caojingxn@163.com

引用格式:覃源,苏江霞,曹靖,等. 考虑方向效应的钢纤维混凝土损伤破坏数值分析[J]. 应用力学学报,2023,40(5):1154-1163.
QIN Yuan, SU Jiangxia, CAO Jing, et al. Numerical analysis of damage and failure of steel fiber reinforced concrete considering orientation coefficient[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(5): 1154-1163.

随着混凝土生产技术的革新和进步，纤维增强混凝土（fiber reinforce concrete，FRC）应运而生。通过向混凝土内掺入韧性高，强度高，极限伸长率大的钢纤维、聚丙烯纤维及玄武岩纤维等增强材料，能显著改善普通混凝土的脆性特征[1-4]。从细观层次上看，它是由骨料、纤维、水泥砂浆和两者之间的交界面组成的多相复合材料[5-7]。这种新型多相的复合材料因抗拉强度高、性能优越，被广泛用于桥梁工程和地下室结构[8-15]。

钢纤维混凝土（steel fiber reinforce concrete，SFRC）是工程领域中应用最为广泛的 FRC。钢纤维的存在不仅提高了混凝土的整体物理力学性能，同时也起到了增韧阻裂作用。然而，乱向分布的钢纤维中有一部分并未在结构受到荷载时及时发挥效用，使得 SFRC 的抗拉性能不能充分发挥。研究学者发现当钢纤维的方向与拉应力的方向接近或者一致时，钢纤维才能充分发挥作用[16]。理论上乱向分布的钢纤维在混凝土中的增强作用仅发挥了 40% 左右，用平均方向效应系数 0.4 表示[17]，实际工程中搅拌与振捣作用对浆体中的钢纤维起到了一定的定向作用，故制备出的混凝土试件平均方向效应系数接近 0.5 左右[18]。平均方向效应系数是指浆体内所有钢纤维趋于给定方向的程度，故可定量描述纤维的方向分布。有学者在制备 SFRC 试件时，通过磁场控制手段，改变了钢纤维的方向：慕儒等[19-20]通过外加磁场影响钢纤维的取向，分析确定了控制钢纤维定向取得最佳效果下的制备条件，提出了定向分布钢纤维混凝土（aligned steel fiber reinforce concrete，ASFRC）的制备方法，其平均方向效应系数可达到 0.9 以上；林建军[21]通过磁场效应改变了钢纤维取向，探究了控制钢纤维方向的影响因素及 ASFRC 的增强效应。依此理论制备出方向效应系数高、钢纤维利用率大的 SFRC 是十分必要的，这是有效改善素混凝土抗拉性能，将钢纤维的增强增韧效应发挥更充分的必要手段。

目前，细观数值模拟是研究 SFRC 力学性能中十分有效的分析方法，不仅能够有效地规避室内实验中人为因素和自然因素的影响，还能模拟试件的材料特性与加载响应，实时反映试件内部应力应变的变化，从细观层次上清晰地呈现出钢纤维增强水泥基复合材料的损伤破坏机理。混凝土是一种对拉应力很敏感的准脆性材料，其破坏形式主要是因受拉而使细观结构失去承载能力，因此如何阻止裂纹在混凝土内部的扩展，提高混凝土整体抗拉能力一直是混凝土力学性能研究中的难题。国内外学者提出了许多从细观层次上描述混凝土破坏的模型，如：唐春安等[22]提出的随机力学特征模型；刘光庭[23]、王江[24]等建立的混凝土随机骨料模型，都成功模拟出混凝土断裂以及裂纹弥散开展的过程，并从细观上分析了混凝土的损伤破坏机理；GRASSL 等[25]采用离散晶格法模拟了基体、骨料以及二者间界面的力学响应，提出了一种单轴拉伸混凝土断裂过程的模拟方法。对于定向短钢纤维混凝土的模拟，王辉明等[26]分别建立了乱向分布的 SFRC 模型、受拉区水平定向分布的 SFRC 模型，以及沿最大主应力方向分布的 SFRC 模型，并进行了抗弯模拟试验；卿龙邦等[27]基于扩展有限元法建立了定向分布的钢纤维混凝土梁，模拟了定向分布的钢纤维 - 水泥基复合材料单轴受拉破坏的过程，研究表明，ASFRC 抗弯强度与抗拉强度均有显著提高。

综上所述，目前虽已有学者成功模拟出 SFRC 裂纹扩展的全过程，并一致认为 ASFRC 的力学性能优于乱向分布的 SFRC，然而，如何从细观层面上解释这一机理，平均方向效应系数如何影响 SFRC 的力学性能，以及不同方向效应系数对 SFRC 损伤破坏的影响程度如何判定，是值得研究和思考的问题。本研究在前述研究的基础上，通过参数化语言建立了 SFRC 数值模型，通过单轴拉伸数值模拟试验，得到了平均方向效应系数对 SFRC 强度以及损伤开裂的影响规律，为 ASFRC 的制备与单轴拉伸条件下混凝土的破坏过程提供依据。

1　数值模型的建立

1.1　模型基本参数

根据混凝土材料的不均匀性、不连续性，本研究从细观层次出发，基于 ANSYS 有限元软件建立了由钢纤维、砂浆及二者间的界面过渡区（interfacial transition zone，ITZ）构成的二维复合材料模型。模型试件统一边长为 150 mm × 150 mm，其中增强材料采用直圆短钢纤维，长度为 30 mm，直径为 0.3 mm，砂浆采用 P · O 42.5 普通硅酸盐水泥；研究表明，ITZ 的实际厚度一般为 20 ~ 100 μm，考虑到数值软件的计算能力，通常将 ITZ 的厚度设置为 0.1 ~ 0.5 mm[28]，本研究模型中 ITZ 的厚度采用 0.2 mm。

1.2 平面模型内钢纤维数量的确定

在同一平面试件内,规定投放的钢纤维形状与尺寸不变,等效钢纤维的数量 n 可根据以下公式[29]来确定

$$n = \mathrm{round}\left(\frac{W \times H \times V_{\mathrm{f}}}{d \times l}\right) \tag{1}$$

其中:n 为二维平面内钢纤维的数量;W、H 分别为试件的长和高,且 $W = H$;V_{f} 为钢纤维的体积率,为 1%;d 为钢纤维的直径;l 为钢纤维的长度;round(x)为取整函数。

1.3 钢纤维投放程序

砂浆浆体中钢纤维的空间位置与倾角走向因投放与搅拌振捣作用而具有随机性。本研究采用蒙特卡罗法完成钢纤维的投放,即根据乘同余法在区间[0,1]上生成伪随机数 X',然后根据坐标变换 $X = a + (b - a)X'$ 得到所求区间[a,b]上分布的随机数 X。因此钢纤维位置坐标与倾角参数(X_i,Y_i,θ_i)可由下式确定

$$\begin{cases} X_i = X_{\min} + (X_{\max} - X_{\min}) \times X' \\ Y_i = Y_{\min} + (Y_{\max} - Y_{\min}) \times Y' \\ \theta_i = \theta_{\min} + (\theta_{\max} - \theta_{\min}) \times \theta' \end{cases} \tag{2}$$

其中:$X_{\min}$、$X_{\max}$、$Y_{\min}$、$Y_{\max}$ 为混凝土模型试件的边界参数;$\theta_{\min}$、$\theta_{\max}$ 为规定钢纤维随机取向范围内的最小值、最大值。该方法保证了钢纤维在投放过程中位置与取向的随机性。且钢纤维投放时也要满足设定的边界条件,以保证钢纤维准确分布于试件之内,不与模型边界相交,边界条件为

$$\begin{cases} X_{\min} + \dfrac{l}{2} < X_i < X_{\max} + \dfrac{l}{2} \\ Y_{\min} + \dfrac{l}{2} < Y_i < Y_{\max} + \dfrac{l}{2} \end{cases} \tag{3}$$

然后利用面的命令建立了钢纤维与砂浆基体。其中布尔运算能够快速扫描、精确判断并充分利用投放空间,有效解决了钢纤维之间相容的问题。最后完成二维钢纤维混凝土模型试件的建立。具体流程如图 1 所示,细观模型如图 2 所示。

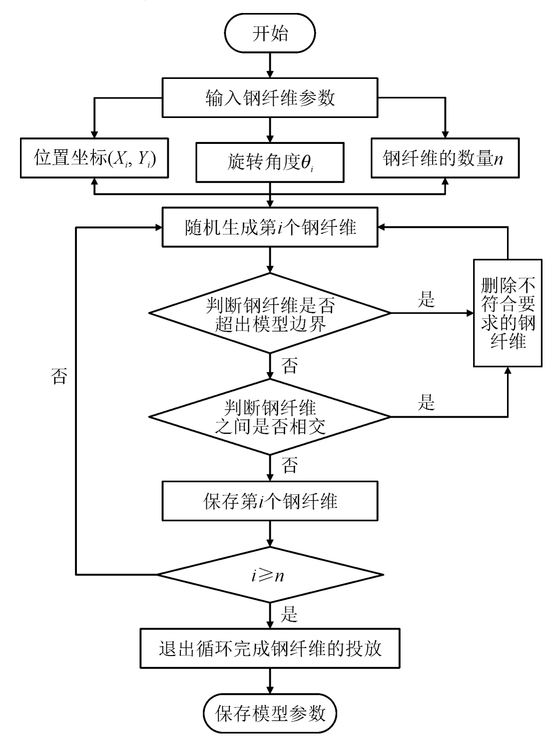
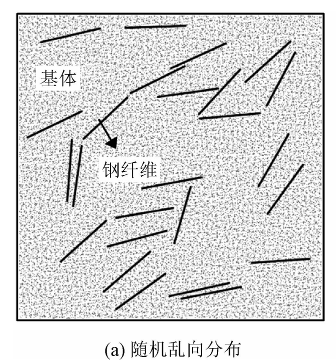


图 1 钢纤维投放流程图

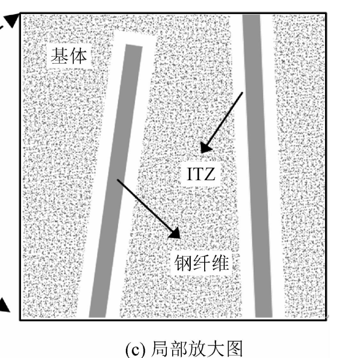
Fig. 1 Flow chart of packing random steel fiber



(a) 随机乱向分布

基体

(b) 定向分布



(c) 局部放大图

图 2 钢纤维混凝土二维细观模型

Fig. 2 Mesoscopic model of 2D SFRC

2 细观单元的本构与强度准则

宏观上混凝土的开裂破坏是由于受力后内部的不断损伤所引起的裂纹萌发与扩展所导致的,而在细观层次上,混凝土不能简单的视为单一的均质材料,各组分的本构关系假定如下。

1)混凝土在受载荷时钢纤维作为增强材料,强

度高,不会发生损伤,裂纹会绕着钢纤维而延伸发展。因此其本构行为假定为线弹性。

2)本研究在现有研究的基础上[22,30],对砂浆基质与界面过渡区采用双线性本构[31],材料未发生破坏时满足初始线弹性行为,当超过峰值应变时,细观单元发生损伤,满足刚度退化后的线弹性行为。其应力应变曲线如图 3 所示。

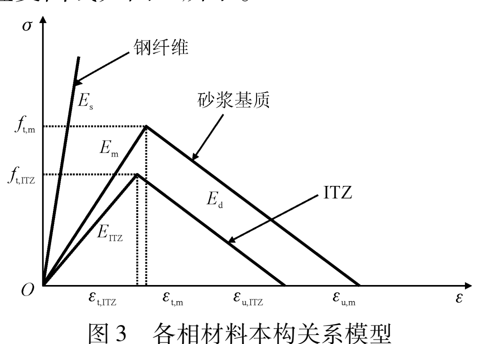


图 3　各相材料本构关系模型

Fig. 3　Constitutive models for the meso-scale components

图 3 中:E_s为钢纤维的弹性模量;E_m与 E_{ITZ}分别为砂浆基质与界面过渡区初始线弹性阶段的刚度;ε_m与 ε_{ITZ}分别为砂浆基质与界面过渡区峰值应力对应的应变;E_d为损伤阶段砂浆基质与界面过渡区的退化刚度;$\varepsilon_{u,m}$与 $\varepsilon_{u,ITZ}$分别为砂浆基质与界面过渡区对应的极限应变。

有限元数值模型在逐步加载的计算过程中,当单元达到规范定义的失效准则或强度破坏准则时,这些单元的刚度、应力、应变等将会被重新赋予为零或者接近于零,以代表这些单元失效,不再参与整体受荷机制,退出模拟计算工作。而单元的失效实际上是为了模拟混凝土试件的断裂及裂缝的产生与演化,即宏观上表达混凝土物理损伤的一种应用手段。有限元软件中单元失效判定准则有基于应变的失效准则,有基于应力的失效准则。本研究采用最大拉应变破坏准则作为损伤判定标准[30,32],即当某些单元的等效应变 ε_1超过其峰值应力对应的应变 ε_t时,这些单元就会发生损伤。按强度理论建立判定条件

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E}[\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)] = \varepsilon_t \tag{4}$$

$$\sigma_{zz} = \sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3) < [\sigma] \tag{5}$$

其中:E 为材料的弹性模量;σ_{zz}为单元计算应力;σ_1、σ_2、σ_3分别为第一、二、三主应力;μ 为材料的泊松比;$[\sigma]$为材料的容许拉应力。

在每一步的位移加载后,进行应力计算分析,依据单元失效判定准则,从所有单元中分别选出超过容许抗拉强度的界面单元和砂浆单元,进行刚度退化处理,并将其定义为失效单元,若当前载荷步内未产生损伤单元,则增加一个载荷步增量,进行下一载荷步的应力计算,并保存每一步的模型数据。随着重启文件的不断运行,在不断的加载过程中,令这些发生刚度退化的、重复累积下来的失效单元类型不显示,即可代表试件中裂缝的生成,最后保存逐步发展的裂纹图像。

3　平均方向效应系数

SFRC 的平均方向效应系数 η_θ是指浆体内所有纤维沿给定方向的投影总和与纤维长度总和的比值,即每根钢纤维与给定方向的夹角(θ_i)余弦值($\cos\theta_i$)的均值,η_θ的范围在 0 ~ 1 之间。当钢纤维的方向与给定方向垂直时(试件内钢纤维与给定方向的夹角 θ_i为 90°,$\cos\theta_i = 0$),η_θ为 0;当钢纤维的方向平行于给定方向时(试件内钢纤维与给定方向的夹角 θ_i为 0°,$\cos\theta_i = 1$),η_θ为 1。依据文献[17]研究成果,通过二次开发分别建立了 η_θ为 0.5、0.6、0.7、0.8、0.9 的 SFRC 模型试件。当建立 η_θ接近于 1(η_θ在 0.9 以上)的 SFRC 模型时,生成过程较为复杂,且因制备 ASFRC 试件时,无论采用何种定向手段,钢纤维的定向效果都不可能达到 100%,故在生成 η_θ接近于 1 的 SFRC 模型时需要界定一个取向范围,以便能够快速生成 η_θ达到 0.96 左右的 SFRC 模型试件。η_θ可用以下公式[33]计算,即

$$\eta_\theta = \frac{\sum_{i=1}^{n} l\cos\theta_i}{nl} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\cos\theta_i \tag{6}$$

其中:η_θ为钢纤维的平均方向效应系数;θ_i为试件内每根钢纤维的取向角度,如图 4 所示;n 为平面模型内钢纤维的数量,由式(1)计算确定;l 为钢纤维的长度。

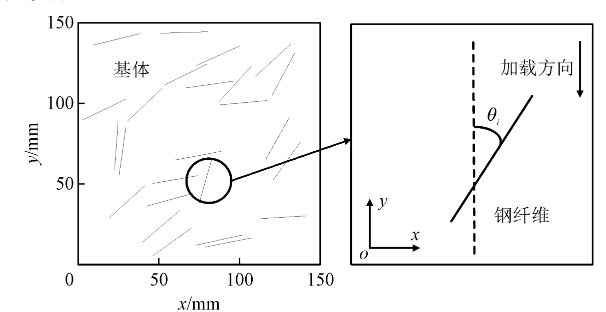


图 4　单个钢纤维的取向 θ_i

Fig. 4　Orientation θ_i of angle steel fiber

4 钢纤维-水泥砂浆数值模拟

4.1 单轴应力状态下数值模拟

模型网格划分采用自由网格匹配三角形的方式对模型进行划分单元。为了准确地模拟试验机进行准静态力的加载,采用位移加载的方式,在模型顶部施加加载步长为 1/3 000 mm 的位移加载。模型底部节点施加竖向约束,同时固定底部中心节点。模型计算中材料力学参数如表 1 所示。

表 1 各材料参数[29]

Tab. 1 Mechanical parameters of various materials[29]

材料属性	基体	钢纤维	界面
密度/(kg · m^{-3})	2 400	7 800	2 300
杨氏模量/GPa	37	210	30
泊松比	0.22	0.3	0.22
抗拉强度/MPa	5.2	–	4.16

4.2 平均方向效应系数对试件抗拉强度的影响

在模拟单轴拉伸试验的过程中,分别输出不同η_θ的模型在各加载增量下的荷载与位移值,从而绘制出拉伸应力与位移曲线,如图 5(a)所示。依据图中曲线的趋势走向将其划分为 4 个阶段,即:直线上升阶段(阶段Ⅰ),该阶段应力位移曲线呈直线增长的趋势,模型试件处于弹性阶段;曲线上升阶段(阶段Ⅱ),当试件的拉伸应力超过峰值应力的 80% 时,试件的弹性模量逐渐减小,直至到达峰值强度;曲线下降阶段(阶段Ⅲ),该阶段试件的拉伸应力不在随位移的增加而增加,而是呈现减小的趋势,试件失去承载能力,强度逐渐减小;曲线二次上升阶段(阶段Ⅳ),该阶段拉伸应力出现了二次增长趋势。国内外研究学者在进行钢纤维混凝土的单向拉伸试验时,发现试件的应力位移曲线出现了两次的增长趋势,这是因为钢纤维对水泥砂浆基体的增强增韧效应,使得钢纤维混凝土试件在开裂后的强度与韧性有所提高。

从复合材料力学性能的角度出发,材料在开裂前所承受的荷载由基体和钢纤维共同承担,故试件的抗拉强度可由下式[34]计算,即

$$\sigma_c = (E_m V_m + \alpha E_f V_f)\varepsilon_c = E_c \varepsilon_c \tag{7}$$

$$\sigma_c = (E_m V_m + E_i V_i + \alpha E_f V_f)\varepsilon_c = E_c \varepsilon_c \tag{8}$$

其中:E、V 为材料的弹性模量与体积率;σ、ε 为应力与应变;下标 c、m、i、f 分别对应复合材料、基体、界面、钢纤维;α 为纤维作用有效系数,$\alpha = \alpha_1 \alpha_2$,$\alpha_1$ 为纤维的长度有效系数,α_1 取 0.5,α_2 为纤维的方向系数。由图 5(b)可知,随着 η_θ 的增大,混凝土试件的抗拉强度从 4.87 MPa 提高到 5.1 MPa,数值模拟结果与理论计算结果误差控制在 5% 以内,并引入文献[29]中的材料参数进行模拟受力计算与理论计算误差分析,模拟结果误差控制在 1% 以内,验证了本研究模型的正确性。

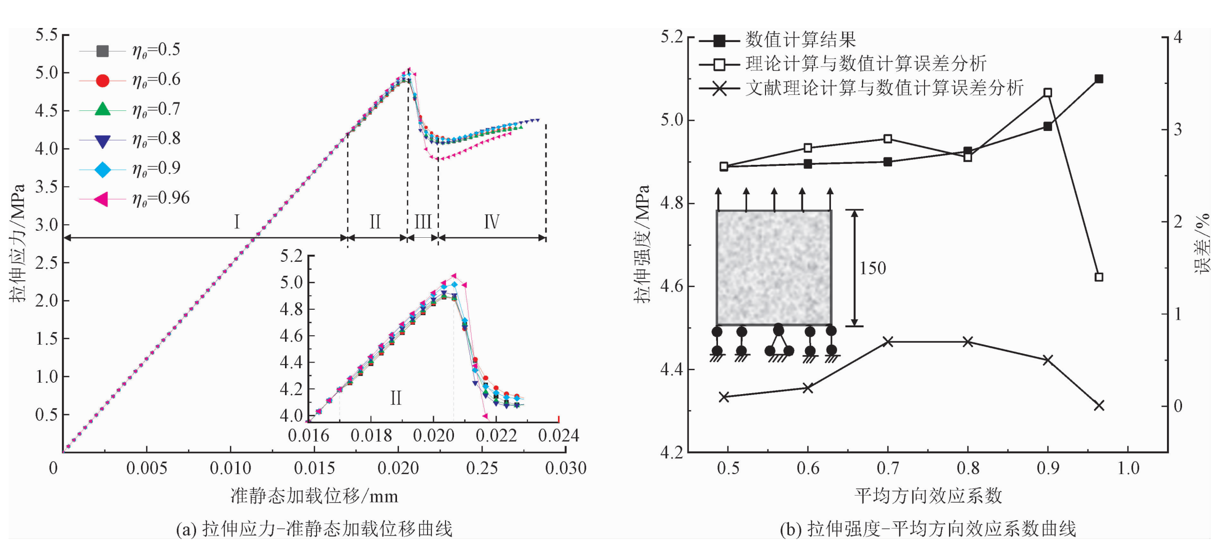


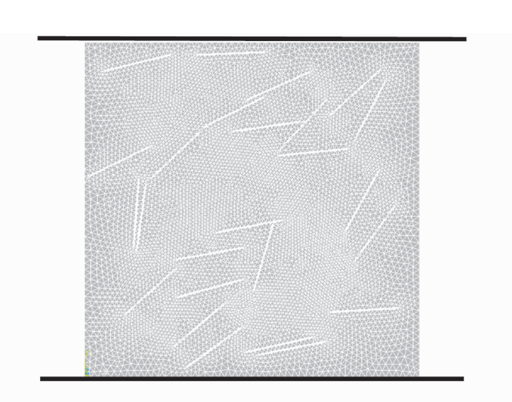
图 5 η_θ对试件抗拉强度的影响

Fig. 5 Effect of η_θ of steel fiber reinforce concrete tensile strength

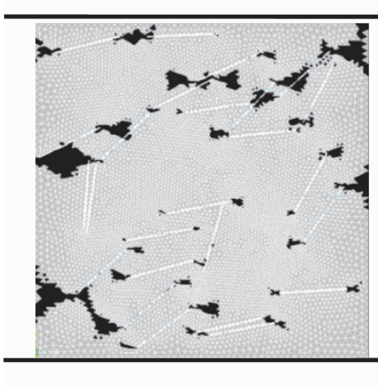
4.3　裂纹演化分析

SFRC 模型试件的裂纹演化过程可对应单轴拉伸应力-准静态加载位移曲线(图 5a)的 4 个阶段:裂纹萌发阶段(阶段Ⅰ);裂纹稳步增长阶段(阶段Ⅱ),裂纹加剧增长阶段(阶段Ⅲ),裂纹缓慢增长阶段(阶段Ⅳ)。以 $\eta_\theta=0.5$ 的模型试件为例,演化在单轴拉伸荷载下的裂纹发展全过程(图 6)。

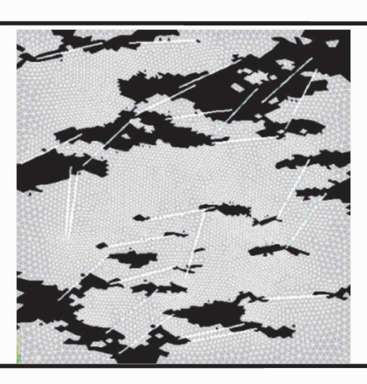
试件在无损阶段、裂纹的萌发阶段(位移在 0 ~ 0.017 mm 内),总体拉应力较小,拉应力局部增大区随机出现在界面过渡区上,并在钢纤维端部引起应力集中,故初始损伤发生在钢纤维端部的界面上,导致随机裂纹萌发(图 6a);裂纹稳步增长阶段,对应拉伸应力位移曲线中的阶段Ⅱ,当位移增量达到 0.017 mm 后，初始损伤开始绕着钢纤维周边拓展,且界面区的损伤达到一定程度时,损伤便开始向背离钢纤维端部的水泥砂浆区域延伸,使得裂纹数量稳步增加,形成多条细微裂纹(图 6b);裂纹加剧增长阶段(位移在 0.020 3 ~ 0.020 7 mm 内),该阶段损伤累积到一定程度,裂纹迅速发展,试件逐渐失去承载能力,多条细微裂缝开始相汇、贯通,试件的宏观裂缝趋势逐渐明朗(图 6c);裂纹缓慢增长阶段,开裂后的 SFRC 试件由于钢纤维的增韧阻裂作用,使得试件的强度出现了二次增长趋势,该阶段裂纹缓慢发展,损伤依然存在,裂缝端部及破损区扩大,直至到达设定的停止加载条件为止(图 6d)形成试件的最终破坏形式。总体来看,在单轴拉伸条件下,模型试件的裂纹发展符合室内单轴拉伸试验下的破坏形式—宏观裂纹通常沿着垂直于主拉应力的方向延伸展开。



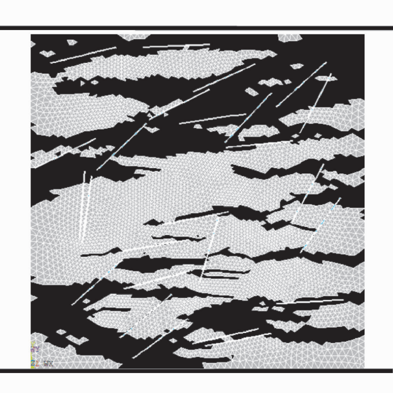
(a) 裂纹萌发阶段



(b) 裂纹稳步增长阶段



(c) 裂纹加剧增长阶段



(d) 裂纹缓慢增长阶段

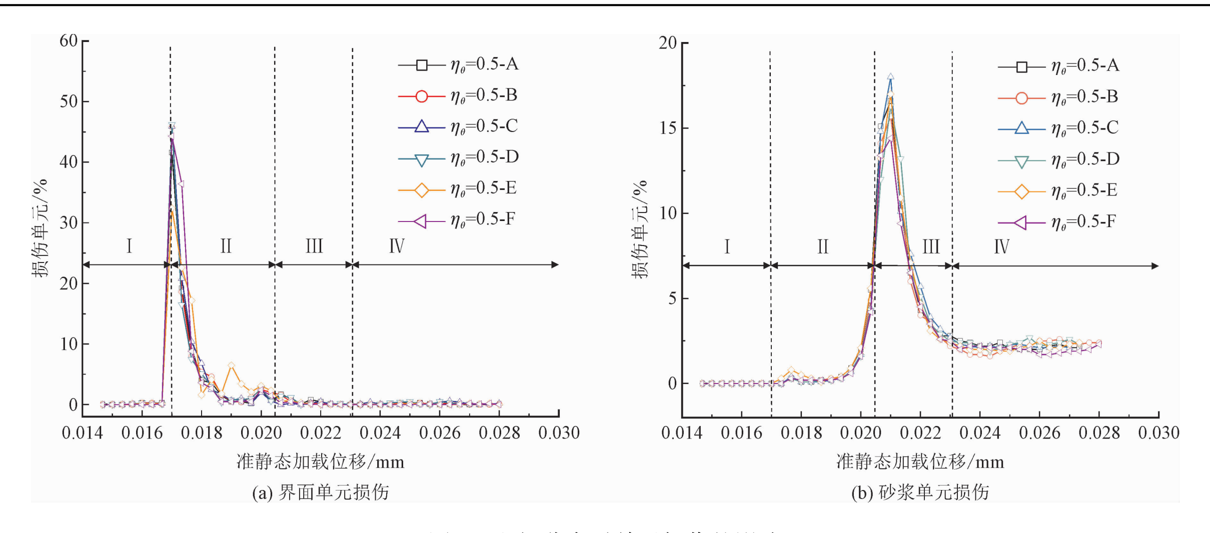
图 6　SFRC 试件破坏过程($\eta_\theta=0.5$)

Fig. 6　Failure process of SFRC specimen($\eta_\theta=0.5$)

4.4　细观单元损伤分析

为了从细观层次上进一步探究试件受力后的开裂损伤情况,提取各加载步细观单元的损伤数量,从而绘制损伤单元与加载位移的曲线。

考虑到本研究建立的模型为非均质材料构成,为控制细观组分的随机空间分布对数值结果的影响,本研究建立了同一 η_θ 下不同空间分布的 5 组模型试件(A、B、C、D、E),并绘制出细观单元损伤与加载位移曲线，以 $\eta_\theta=0.5$ 的模型为例（图 7)。



(a) 界面单元损伤

(b) 砂浆单元损伤

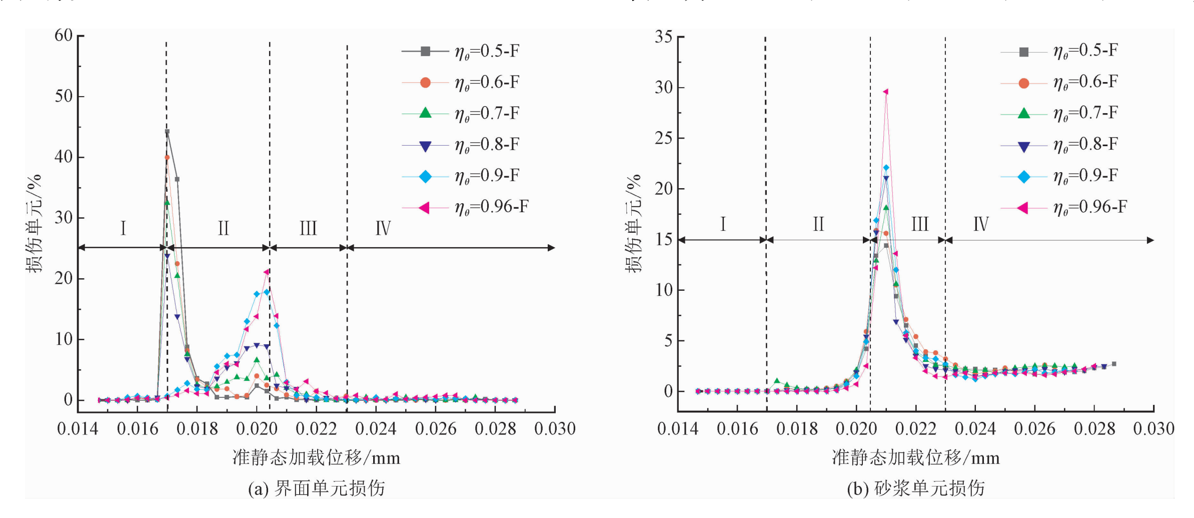
图 7 空间分布对单元损伤的影响

Fig. 7 Influence of spatial distribution on damage of mesoscopic elements

从图 7 中观察到,位移在 0 ~ 0.015 3 mm 内,试件处于无损阶段,界面单元与砂浆单元均未出现损伤;当位移达到 0.016 7 mm 时,强度较低的界面单元最先出现损伤而砂浆单元未发生损伤,试件处于初始损伤阶段;当位移为 0.017 mm 时,界面单元损伤达到峰值,为界面单元加速损伤阶段;随后,损伤逐渐减小并趋于平稳,而砂浆单元在峰值荷载阶段(位移为 0.020 3 mm)损伤迅速增长至峰值,随后,损伤逐渐减小并趋于平稳。

从图中观察到 η_θ为 0.5 的模型 A、B、C、D、E 细观单元损伤量与位移加载曲线的趋势大致相同,因此拟合 5 组数据得到曲线 F,以控制空间分布随机性的影响。

1)建立不同平均方向效应系数的模型试件,并绘制单元损伤与加载位移曲线,如图 8 所示。其中不同 η_θ的损伤曲线为 5 组同 η_θ下模型试件损伤曲线的拟合结果(即曲线 F)。从图中观察到在界面单元加速损伤阶段,试件(η_θ = 0.5,0.6,0.7,0.8)的界面单元损伤达到峰值(损伤占比分别为 44.3%、40%、32.5%、23.8%);而试件(η_θ = 0.9,0.964)的初始损伤阶段历时较长,随着位移荷载步的增加,损伤幅度较小,基本趋于平缓,界面单元的加速损伤阶段出现的较晚,靠近峰值荷载阶段界面单元的损伤达才到峰值(损伤占比分别为 17.8%、21.1%),且在此阶段砂浆单元迅速发生损伤并达到峰值(损伤占比为 14.4%、15.6%、18.1%、21.1%、34.6%)。



(a) 界面单元损伤

(b) 砂浆单元损伤

图 8 方向效应系数对单元损伤的影响

Fig. 8 Influence of orientation coefficient on damage of mesoscopic elements

在峰值荷载阶段之前,试件的砂浆单元损伤基本维持恒定,而界面单元随着 η_θ的增大,损伤减小;当达到峰值荷载后,砂浆单元迅速发生损伤并达到峰值,砂浆单元随着 η_θ的增大,损伤增大。在最后

阶段Ⅳ时，界面单元与砂浆单元损伤均较稳定，只有微小浮动。

可见，试件在单轴拉伸情况下，界面单元占主导影响因素，在初损阶段试件未开裂，因界面单元的损伤差异而导致拉伸位移曲线开始出现差异，η_θ大的SFRC试件界面单元损伤的越少，阻裂作用发挥得越好；而在峰值荷载阶段后，试件开裂，η_θ大的钢纤维桥接作用发挥的越充分。

2）本研究中取钢纤维的掺量为1%，由式（1）计算可得二维平面内掺入水泥砂浆中钢纤维的个数为25根，计算不同η_θ模型试件内各钢纤维的$\cos\theta_i$，即每根钢纤维的方向效应系数$\eta_{\theta i}$，并统计在最终载荷步时每根钢纤维周围界面单元的剩余百分比β，如图9所示。

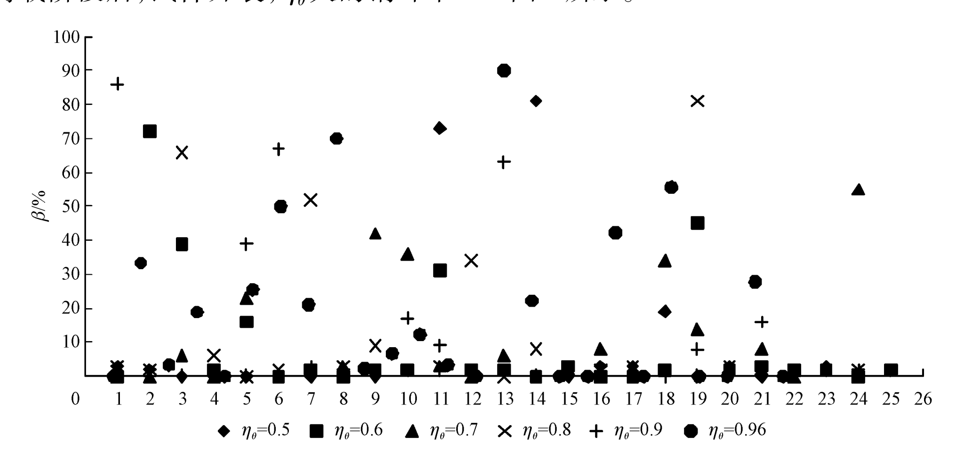


图9　试件内各钢纤维的作用效应

Fig. 9　The effect of each steel fiber in the specimen

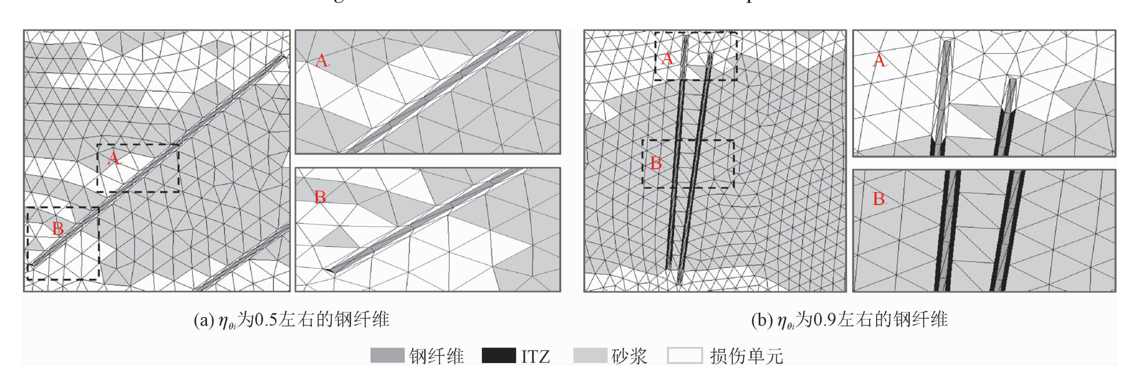


图10　不同$\eta_{\theta i}$的钢纤维细观损伤模型

Fig. 10　Mesoscopic damage models with different $\eta_{\theta i}$

从图9中可以观察到，η_θ为0.5的SFRC模型试件，第11、14根钢纤维的$\eta_{\theta i}$分别为0.99、1，它周围覆盖的β值分别为81%、73%，而第3、4、9根等钢纤维的$\eta_{\theta i}$基本位于0.5以下，其周围盖的β值基本为0；$\eta_\theta=0.96$的SFRC模型试件，各钢纤维的取向都接近于平行加载方向，各钢纤维的$\eta_{\theta i}$接近于1，定向效果最佳，大部分钢纤维周围覆盖的β也较大，为30%、50%、70%、90%左右；$\eta_\theta=0.6, 0.7, 0.8, 0.9$的SFRC模型试件，钢纤维的定向程度逐渐提高，$\eta_{\theta i}$数值接近于1的钢纤维占比逐渐加大，试件在加载后，钢纤维周围覆盖的β值逐渐增大，与此连接的砂浆单元分布也逐渐密集，如图10所示，$\eta_{\theta i}$为0.5左右的钢纤维周边界面单元损伤殆尽，砂浆单元也有一定扩展（图10a），而$\eta_{\theta i}$为0.9左右的钢纤维周边界面单元仅在端部出现损伤，且与此连接的砂浆单元密集（图10b）。由此可得，SFRC试件内钢纤维的$\eta_{\theta i}$越高，定向效果越好，则阻裂桥接效果就愈好。

5　结　论

本研究从细观角度揭示了平均方向效应系数对钢纤维混凝土试件抗拉强度的影响规律，研究了其对试件的损伤开裂以及增韧阻裂作用的影响。主要结论如下。

1）纤维取向是影响纤维混凝土力学性能的重要因素之一，而平均方向效应系数是描述纤维取向的

一个重要指标。研究结果表明,钢纤维增强水泥基复合材料的抗拉强度随平均方向效应系数的增加而提高。

2)钢纤维增强水泥基复合材料在单轴受拉条件下,细观模型的裂纹发展与室内试验下的破坏形式大致吻合。且模型平均方向效应系数越大,表明钢纤维定向程度越高,试件在开裂前,细观单元损伤程度较小,则钢纤维的阻裂作用发挥得越充分,试件开裂后的桥接效果越好。

3)试件内某钢纤维的子方向效应系数 $\eta_{\theta i}$越大,则试件开裂后该钢纤维周围覆盖的界面单元(β)以及与此连接的砂浆单元越密集,表明阻裂桥接作用越好。

参考文献:

[1] 田梦云,张恩,曹瑞东,等.基于细观尺度的混凝土单轴力学性能仿真计算分析[J].应用力学学报,2020,37(3):975-981.
TIAN Mengyun,ZHANG En,CAO Ruidong,et al. Meso-scale simulation analysis of uniaxial mechanical behavior of concrete[J]. Chinese journal of applied mechanics,2020,37(3):975-981(in Chinese).

[2] 霍琳颖,毕继红,王照耀,等.单向受拉状态下钢纤维混凝土的二次峰值强度[J].水力发电学报,2021,40(2):223-233.
HUO Linying, BI Jihong, WANG Zhaoyao, et al. Second peak strength of steel fiber reinforced concrete under uniaxial tension [J]. Journal of hydroelectric engineering, 2021, 40(2): 223-233 (in Chinese).

[3] 唐宇翔,陈红鸟,王青原,等.基于扩展有限元法的混凝土断裂参数研究[J].应用力学学报,2019,36(6):1307-1313.
TANG Yuxiang,CHEN Hongniao,WANG Qingyuan,et al. Study of fracture parameters of concrete based on extended finite element method[J]. Chinese journal of applied mechanics,2019,36(6):1307-1313(in Chinese).

[4] 李平,李永池,段士伟.一种微裂纹型拉伸损伤模型在混凝土材料中的应用[J].应用力学学报,2019,36(5):1183-1189.
LI Ping, LI Yongchi, DUAN Shiwei. Application of a microcrack tensile damage model in concrete materials[J]. Chinese journal of applied mechanics,2019,36(5):1183-1189(in Chinese).

[5] 高丹盈,黄云超,金星,等.高强钢筋钢纤维混凝土黏结应力分布计算方法[J].应用力学学报,2019,36(5):998-1004.
GAO Danying, HUANG Yunchao, JIN Xing, et al. Calculation method of bond stress distribution of high strength steel bar and steel fiber reinforced concrete[J]. Chinese journal of applied mechanics,2019,36(5):998-1004(in Chinese).

[6] 毕继红,霍琳颖,乔浩玥,等.单向受拉状态下的钢纤维混凝土本构模型[J].工程力学,2020,37(6):155-164.
BI Jihong,HUO Linying,QIAO Haoyue,et al. A constitutive model of steel fiber reinforced concrete under uniaxial tension[J]. Engineering mechanics,2020,37(6):155-164(in Chinese).

[7] 夏晓舟,章青,汤书军.混凝土细观损伤破坏过程的数值模拟[J].河海大学学报(自然科学版),2007,35(3):319-325.
XIA Xiaozhou,ZHANG Qing,TANG Shujun. Numerical simulation of meso-damage process for concrete material[J]. Journal of Hohai University (natural sciences), 2007, 35(3): 319-325 (in Chinese).

[8] MEHRPAY S,UEDA T. Simulation of steel fibre reinforced concrete using RBCS discrete model[J]. Construction and building materials,2021,266,Part A:120889.

[9] HUI L,LÓPEZ-ALMANSA F. New modifying truss model and numerical simulation of steel fiber reinforced concrete under pure torsion[J]. STRUCTURES,2018,14:32-42.

[10] JING H,LI Y Q. Nonlinear finite element analysis of layered steel fiber reinforced concrete beam[J]. Applied mechanics and materials,2012,166-169:616-619.

[11] XU J X,YIN T J,WANG Y,et al. Anisotropic electrical and piezoresistive sensing properties of cement-based sensors with aligned carbon fibers [J]. Cement and concrete composites, 2021, 116:103873.

[12] LIU J Z,SUN W,MIAO C W,et al. Assessment of fiber distribution in steel fiber mortar using image analysis[J]. Journal of Wuhan University of Technology(materials science edtion),2012,27(1):166-171.

[13] RAJU R A,LIM S,AKIYAMA M,et al. Effects of concrete flow on the distribution and orientation of fibers and flexural behavior of steel fiber-reinforced self-compacting concrete beams[J]. Construction and building materials,2020,262:119963.

[14] ANSARI RAD T,TANZADEH J,POURDADA A. Laboratory evaluation of self-compacting fiber-reinforced concrete modified with hybrid of nanomaterials[J]. Construction and building materials, 2020,232:117211.

[15] LU Z A,FAN X C,CHEN Y B. Mechanical properties of layered steel fiber and hybrid fiber reinforced concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology(materials science edtion),2008,23(5):733-736.

[16] SOROUSHIAN P,LEE C D. Distribution and orientation of fibers in steel fiber reinforced concrete[J]. Materials journal,1990,87(5):433-439.

[17] LEE C,KIM H. Orientation factor and number of fibers at failure plane in ring-type steel fiber reinforced concrete[J]. Cement and concrete research,2010,40(5):810-819.

[18] 慕儒,邱欣,赵全明,等.单向分布钢纤维增强水泥基复合材料(I):钢纤维方向控制[J].建筑材料学报,2015,18(2):208-213.
MU Ru,QIU Xin,ZHAO Quanming,et al. Aligned steel fibre reinforced cement based composites(I):Orientation control of steel fibres[J]. Journal of building materials,2015,18(2):208-213(in Chinese).

[19] 慕儒,李辉,王晓伟,等.单向分布钢纤维增强水泥基复合材料(Ⅱ):制备及钢纤维增强作用[J].建筑材料学报,2015,18

(3):387-392.

MU Ru, LI Hui, WANG Xiaowei, et al. Aligned steel fibre reinforced cement based composites (Ⅱ): Preparation and reinforcement of aligned steel fibres[J]. Journal of building materials, 2015,18(3):387-392(in Chinese).

[20] MU R, DIAO C R, LIU H Q, et al. Design, preparation and mechanical properties of full-field aligned steel fiber reinforced cementitious composite[J]. Construction and building materials, 2021,272:121631.

[21] 林建军.水泥基材料中钢纤维的方向控制及增强效应研究[D].天津:河北工业大学,2015.

[22] 朱万成,黄明利,唐春安.混凝土试件裂纹扩展及破坏过程的计算机模拟[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2000,19(3):271-274.

ZHU Wancheng, HUANG Mingli, TANG Chunan. Computer simulation on cracks propagation and failure process of concrete specimen[J]. Journal of Liaoning Technical University (natural science edition),2000,19(3):271-274(in Chinese).

[23] 刘光廷,王宗敏.用随机骨料模型数值模拟混凝土材料的断裂[J].清华大学学报(自然科学版),1996(1):84-89.

LIU Guangting, WANG Zongmin. Numerical simulation study of fracture of concrete materials using random aggregate model[J]. Journal of Tsinghua University (science and technology), 1996(1):84-89(in Chinese).

[24] 王江,许斌,陈洪兵.混凝土受拉性能多尺度均匀化数值模拟研究[J].应用力学学报,2019,36(3):538-546.

WANG Jiang, XU Bin, CHEN Hongbing. Numerical simulation of the tensile behavior of concrete using multi-scale homogenization approach[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2019,36(3):538-546(in Chinese).

[25] GRASSL P, JIRÁSEK M. Meso-scale approach to modelling the fracture process zone of concrete subjected to uniaxial tension[J]. International journal of solids and structures, 2010,47(7/8):957-968.

[26] 王辉明,朱文,贺正波.纤维定向布放钢纤维混凝土力学性能及断裂过程细观分析[J].水力发电,2021,47(6):50-54.

WANG Huiming, ZHU Wen, HE Zhengbo. Mesoscopic analysis of mechanical properties and fracture process of aligned steel fiber reinforced concrete[J]. Water power, 2021,47(6):50-54(in Chinese).

[27] 卿龙邦,喻渴来,慕儒,等.定向钢纤维增强水泥基复合材料抗拉细观模拟[J].建筑材料学报,2018,21(4):561-567.

QING Longbang, YU Kelai, MU Ru, et al. Meso-scale simulation of tension properties for aligned steel fiber reinforced cementitious composites[J]. Journal of building materials, 2018, 21(4):561-567(in Chinese).

[28] 兰晓芳.基于扩展有限元的钢纤维混凝土断裂破坏数值研究[D].郑州:郑州大学,2019.

[29] 薛兵.基于细观尺度的钢纤维混凝土损伤破坏数值模拟研究[D].徐州:中国矿业大学,2017.

[30] 唐春安,朱万成.混凝土损伤与断裂:数值试验[M].北京:科学出版社,2003.

[31] 李冬,金浏,杜修力,等.骨料级配对二维模型混凝土单轴抗拉强度影响的理论研究[J].工程力学,2017,34(6):64-72.

LI Dong, JIN Liu, DU Xiuli, et al. A theoretical study on the influence of aggregate gradation on the tensile strength of 2-dimensional model concrete[J]. Engineering mechanics, 2017, 34(6):64-72(in Chinese).

[32] 吴锋,卓家寿.混凝土材料破坏过程的细观数值模拟[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2008,27(5):705-708.

WU Feng, ZHUO Jiashou. Numerical simulation of fracture propagation of concrete on meso-level[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (natural science),2008,27(5):705-708(in Chinese).

[33] 慕儒,赵全明,田稳苓.单向分布钢纤维增强水泥浆的制备与性能研究[J].河北工业大学学报,2012,41(2):101-104.

MU Ru, ZHAO Quanming, TIAN Wenling. Investigation on the preparation and properties of aligned steel fibre reinforce cement paste[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2012, 41(2):101-104(in Chinese).

[34] 李建辉.粗合成纤维混凝土力学特性及其细观增强机理[D].北京:北京工业大学,2006.

（编辑　李坤璐）